

光纤环形镜线形腔掺 Er³⁺ 光纤激光器输出特性的数值分析*

高雪松 高春清 宋学勇 李家泽 魏光辉

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘 要 在分析光纤环形镜工作原理的基础上, 给出了基于光纤环形镜的线形腔掺 Er³⁺ 光纤激光器相位和幅度的振荡条件. 通过求解速率方程, 理论分析了其输出特性, 获得了稳态条件下激光器输出功率、阈值泵浦功率和斜率效率的解析表达式. 推导出激光器工作所需掺 Er³⁺ 光纤最短长度, 并在给定泵浦光功率时, 在特定输出波长上获得最大输出功率所需最佳掺 Er³⁺ 光纤长度的表达式, 且通过实验进行了验证.

关键词 物理电子学; 光纤激光器; 光纤环形镜; 线形腔; 掺 Er³⁺ 光纤; 速率方程

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

0 引言

掺 Er³⁺ 光纤激光器因其在 1550 nm 波段输出波长与通讯光纤最低损耗窗口相匹配而备受青睐, 其具有结构简单、高增益、低噪音、可实现宽带调谐和窄线宽输出等优点, 成为激光领域最活跃的课题之一^[1]. 制作掺 Er³⁺ 光纤激光器谐振腔的传统方法是使用介质膜或金属膜构成 F-P 腔. 与之相比光纤环形镜具有结构紧凑、性能可靠、易与光纤连接、构成全光纤器件、稳定性好等特点, 另外对波长的依赖性差, 可形成宽带反射镜, 如果在另一端加上窄带光纤光栅, 则激光器输出波长完全由光纤光栅反射谱决定, 该特点可用于光纤激光器宽带调谐. 随着制造工艺和理论的进步, 光纤环形镜与光纤光栅构成谐振腔成为研究热点^[2].

本文在分析光纤环形镜工作原理的基础上, 给出了基于光纤环形镜的线形腔掺 Er³⁺ 光纤激光器相位和幅度的振荡条件. 通过求解速率方程, 理论分析了其输出特性, 获得了稳态条件下激光器输出功率、阈值泵浦功率和斜率效率的解析表达式, 推导出激光器工作所需掺 Er³⁺ 光纤最短长度, 以及在给定泵浦光功率时, 在特定输出波长上获得最大输出功率所需最佳掺 Er³⁺ 光纤长度的表达式. 并进行了实验验证.

1 光纤环形镜工作原理

光纤环形镜结构如图 1, 它包含一个定向耦合器和由该耦合器两输出端口形成的光纤圈. 实际制作工艺简单, 只需要将一单模光纤的两端利用熔锥

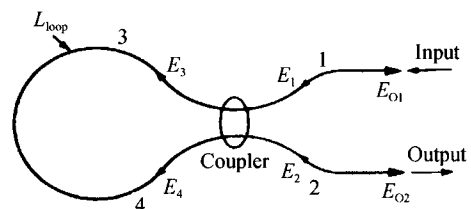


图 1 光纤环形镜结构
Fig. 1 Diagram of fiber loop mirror

法制成耦合器即可. 其工作原理为, 入射光进入耦合器后, 分成具有 $\pi/2$ 位相延迟沿顺时针和逆时针传输的两束光. 不考虑光纤和耦合器的偏振效应有^[3]

$$r_{loop} = 2iK^{1/2}(1-K)^{1/2}(1-\gamma)\exp [(-\alpha + i\beta)L_{loop}] = r'_{loop} \exp [(-\alpha + i\beta)L_{loop}] \quad (1)$$

$$t_{loop} = (1-2K)(1-\gamma)\exp [(-\alpha + i\beta)L_{loop}] = t'_{loop} \exp [(-\alpha + i\beta)L_{loop}] \quad (2)$$

式中 K 为耦合器强度分束比, L_{loop} 为光纤圈长度, r_{loop} 和 t_{loop} 分别为光纤环形镜反射系数和透射系数, γ 为耦合器附加损耗, α 为圈中任一方向的单程衰减系数(传输损耗+焊接损耗), β 为光纤传播常量. 式(1)和(2)求模平方则得到强度反射率 R_1 和透射率 T 分别为

$$\begin{cases} R_1 = 4K(1-K)(1-\gamma)^2 \exp(-2\alpha L_{loop}) \\ T = (1-2K)^2(1-\gamma)^2 \exp(-2\alpha L_{loop}) \end{cases} \quad (3)$$

由于器件具有对称性, 满足关系式

$$\left(\frac{P_r}{P_i}\right) = (1-\gamma)^2 \exp(-2\alpha L_{loop}) \cdot$$

$$\begin{pmatrix} 4K(1-K) & (1-2K)^2 \\ (1-2K)^2 & 4K(1-K) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{in} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中 P_{in} 为输入功率, P_r 为反射光功率, P_i 为透射光功率, 实际中由于熔接会带来损耗, 其关系式为

$$\alpha_{loop}^{abs} = 1 - R_1 - T = 1 - (1-\gamma)^2 e^{-2\alpha L_{loop}} \quad (5)$$

式中 α_{loop}^{abs} 为吸收系数, 表示由光纤环形镜引起的损耗. 由于利用熔锥法制成的光纤耦合器附加损耗非

* 国家部委基金(YJ0467006)资助
Tel: 010-86323271 Email: gxs1980@sina.com
收稿日期: 2005-08-06

常小^[4];若光纤圈半径足够大,可以避免弯曲损耗,因此光纤环形镜中损耗可忽略不计,即 $\alpha_{loop}^{abs} = \gamma = \alpha = 0$. 此时式(3)和(4)分别简化为

$$\begin{cases} R_1 = 4K(1-K) \\ T = (1-2K)^2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} P_r \\ P_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4K(1-K) & (1-2K)^2 \\ (1-2K)^2 & 4K(1-K) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{in} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

由式(7)可知,通过调节耦合器强度分束比 K 可以控制透射和反射强度. 图 2 分别为 R_1 和 T 随 K 的变化曲线,当 $K=0$ 或 $K=1$ 时,都有 $R_1=0$ 或 $T=1$,光纤圈环形镜全透射;当 $K \approx 0.147$ 或 $K=0.853$ 时,两曲线交点处 $R_1=T=0.5$,光纤环形镜半透射半反射;当 $K \approx 0.5$ 时,则有 $R_1=1$ 或 $T=0$,光纤环形镜起到全反射镜的作用,如图 1,此时从 1 端口入射的光将全部返回 1 端口.

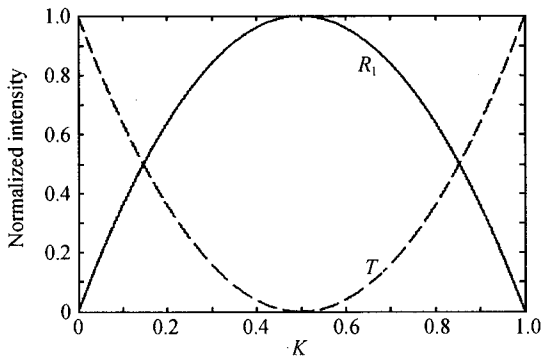


图 2 R_1 和 T 随 K 的变化曲线

Fig. 2 R_1, T versus K

实际中耦合器分束比不可能严格 1:1,当 $K \neq 0.5$ 时,光纤环形镜中将存在自相位调制,则入射光场在经历 L_{loop} 路径后产生相移 ϕ ,则光场 E_1 从 1 端口输入耦合器环行一周后其光场变为

$$\begin{cases} E_3 = K^{1/2} E_1 \exp(iK\phi) \\ E_4 = i(1-K)^{1/2} E_1 \exp[i(1-K)\phi] \end{cases} \quad (8)$$

则 2 端口输出光强为

$$|E_2|^2 = E_2 \cdot E_2^* = |E_1|^2 \{1 - 2K(1-K) \cdot [1 + \cos((1-2K)\phi)]\} \quad (9)$$

令 $\phi = m\pi/(1-2K)$,当 m 为奇数时有

$$|E_2|_{\max}^2 = |E_1|^2 \quad (10)$$

此时 2 端口输出光强最大,光纤环形镜相当于半波相位延迟器. 当 m 为偶数时有

$$|E_2|_{\min}^2 = |E_1|^2 [1 - 4K(1-K)] = |E_1|^2 (1-2K)^2 \quad (11)$$

此时 2 端口输出光强最小,光纤环形镜相当于全波相位延迟器.

此外,由于光纤双折射的原因,也会导致从端口 1 输入光有一部分从 2 端口输出. 1550 nm 波段从端口 1 反射光与从端口 2 透射光光强比如图 3. 当

$K=0.48 \sim 0.52$ 时都有 $|E_1|^2/|E_2|^2 \gg 500$,端口 2 透射光强远小于端口 1 反射光强,因此光纤环形镜可以作为激光器的全反射端面,并且由于光纤环形镜与光纤激光器其它元件易于熔接,因此比一般的光学反射镜作为谐振腔端镜损耗小很多.

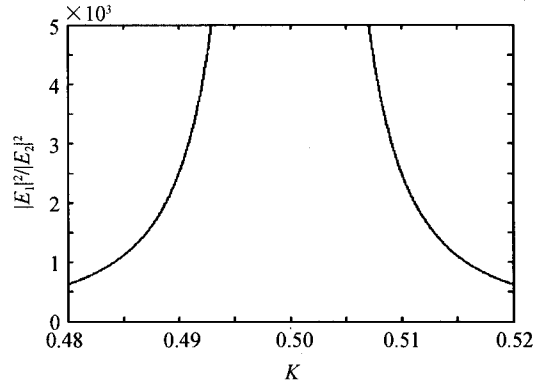


图 3 端口 1 反射光与端口 2 透射光光强比与耦合输出比之间的关系

Fig. 3 $|E_1|^2/|E_2|^2$ versus K

2 光纤环形镜-光纤光栅作为腔镜的谐振腔

2.1 谐振腔有效长度的确定

光纤环形镜和光纤光栅作为腔镜的线形腔掺 Er³⁺ 光纤激光器结构如图 4. 未掺杂光纤构成如图

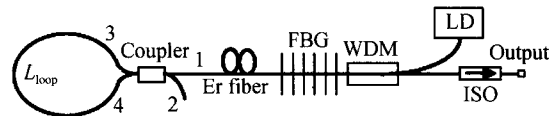


图 4 光纤环形镜和光纤光栅作为腔镜的线形腔掺 Er³⁺ 光纤激光器

Fig. 4 Schematic diagram of linear cavity Er³⁺ doped fiber laser based on fiber loop mirror and fiber bragg grating

所示谐振腔时,由各场分量输出表达式求和可得出场为

$$E_{out} = \frac{E_{in} t'_{loop} t_2 \exp [(-\alpha + j\beta)(L_{er} + L_{loop})]}{1 - r'_{loop} r_2 \exp [(-\alpha + j\beta)(2L_{er} + L_{loop})]} \quad (12)$$

式中 r_2 和 t_2 分别为光栅的反射系数和透射系数, E_{in} 为输入光场, L_{er} 为光纤圈和光纤光栅之间光纤长度. 则输出功率 P_{out} 可通过式(12)各项乘以各自的共轭复数求得

$$P_{out} = [(t'_{loop} t_2)^2 \exp(-2\alpha L_{er})] / \{ [1 - r'_{loop} r_2 \cdot \exp[-\alpha(2L_{er} + L_{loop})]]^2 + 4r'_{loop} r_2 \cdot \exp[-\alpha(2L_{er} + L_{loop})] \sin^2[\beta(L_{er} + L_{loop}/2) + \frac{\pi}{4}] \} P_{in} \quad (13)$$

式中 P_{in} 为输入光功率. 有效腔长由式(13)中正弦项确定, $L = L_{er} + L_{loop}/2$ 即光纤圈与光栅之间长度加上光纤圈长度的一半^[5]. 其谐振发生在 $\beta(L_{er} + L_{loop}/2) = (-\pi/4, 3\pi/4, 7\pi/4, \dots)$ 处, 相位间隔为 π .

2.2 振荡条件的确定

当光纤环形镜和光纤光栅之间为掺杂光纤时, 光纤的净损耗由损耗和增益之差决定; 由于粒子反转区域的影响, 此时掺杂光纤中传播常量有一附加相位项. 因此幅度和相位的振荡条件分别为

$$\begin{cases} G(\lambda) = \alpha(2L_{er} + L_{loop}) - \ln(|r'_{loop} r_2|) \approx \\ -\ln(|r'_{loop} r_2|) \\ \Delta\beta L_{er} = \left(-\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}, \dots\right) - \frac{\Delta\beta L_{er}}{2} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)表明, 由于粒子数反转的存在, 激光发生的相位条件与无源腔相比移动了 $\Delta\beta L_{er}$.

3 求解速率方程

图 4 所示, 980 nm LD 泵浦掺 Er^{3+} 光纤激光器为一个三能级系统, 光纤环形镜对泵浦光透明, 泵浦光仅通过光纤一次, 不考虑激发态吸收和相互作用上翻转对上能级粒子数密度的影响. 掺 Er^{3+} 光纤荧光谱 Stark 分裂谱线均匀加宽, 纤芯内 Er^{3+} 离子均匀分布. 根据速率方程和边界条件可得输出光功率为^[6]

$$P_{out} = (1 - R_2) P_s^+(L) = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{P_p^{sat} \sqrt{R_1} (1 - R_2)}{(1 - R) (\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})} \cdot \left(\frac{P_p^{in}}{P_p^{sat}} \{1 - \exp[-\phi(\lambda)]\} - \alpha_p L_{er} + \phi(\lambda) \right) \quad (15)$$

式中 $P_p^{sat} = (h\nu_p / \sigma_p \tau) (A/A_p)$ 为泵浦光和信号光饱和功率; λ_p 和 ν_p 分别为泵浦光波长和频率; λ 为振荡光波长; $P_p(z)$ 和 $P_s(z)$ 分别为泵浦光功率和振荡光功率沿光纤长度分布, 正号表示振荡光传输方向与泵浦光相同, 负号表示与泵浦光传输方向相反; σ_p 为泵浦光吸收截面; A_p 为泵浦光场重迭积分; A_s 为振荡光场重迭积分; n_2 和 n_1 为上、下能级粒子数占总粒子数百分比; τ 为上能级粒子寿命; A 为掺 Er^{3+} 光纤芯区面积; $R_2 = r_2^2$ 为出射端光纤光栅反射率, $L = L_{er} + L_{loop}/2$ 为谐振腔有效腔长. 取

$$\ln\left(\frac{P_p^{out}}{P_p^{in}}\right) = -\frac{\alpha_p [g(\lambda)L_{er} + \ln R]}{g(\lambda) + a(\lambda)} = -\phi(\lambda) \quad (16)$$

式中 $g(\lambda) = \sigma_E(\lambda) A_s \rho$ 和 $a(\lambda) = \sigma_A(\lambda) A_s \rho$ 分别为掺

Er^{3+} 光纤的增益和衰减系数, 均为信号光波长的函数; $\sigma_p = \sigma_p A_p \rho$ 为掺 Er^{3+} 光纤的泵浦吸收系数; $\sigma_E(\lambda)$ 和 $\sigma_A(\lambda)$ 为振荡光受激与吸收截面; ρ 为掺 Er^{3+} 光纤掺杂浓度. 则斜率效率为

$$\eta = \frac{dP_{out}}{dP_p^{in}} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{\sqrt{R_1} (1 - R_2)}{(1 - R) (\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})} \cdot \{1 - \exp[-\phi(\lambda)]\} \quad (17)$$

当 $P_{out} = 0$ 得阈值泵浦功率为

$$P_p^{in} = \frac{\alpha_p L_{er} - \phi(\lambda)}{1 - \exp[-\phi(\lambda)]} P_p^{sat} \quad (18)$$

取激光器斜率效率等于零, 可以得到激光器受激发射所需最短的掺 Er^{3+} 光纤长度为

$$L_{min} = -\frac{\ln R}{g(\lambda)} = -\frac{\ln R_1 R_2}{2\sigma_E(\lambda) A_s \rho} \quad (19)$$

其物理意义为: 给定掺 Er^{3+} 光纤, 在特定波长范围内, 若掺 Er^{3+} 光纤长度小于最短长度, 即使泵浦功率很高, 掺 Er^{3+} 光纤所能提供的增益也无法克服激光器的损耗而使激光器实现受激发射. 给定受激发射波长 $dP_{out}/dL = 0$, 激光器输出功率达到最大时, 掺 Er^{3+} 光纤最佳长度为

$$L_{opt} = \frac{g(\lambda) + a(\lambda)}{g(\lambda) \alpha_p} \ln \left[\frac{g(\lambda) P_p^{in}}{a(\lambda) P_p^{sat}} \right] - \frac{\ln R_1 R_2}{g(\lambda)} \quad (20)$$

由式(20)可知, 最佳长度与入射泵浦光功率的大小和受激发射波长有关.

4 数值模拟与实验对比

利用上述模型, 根据文献[7, 8]所提供的参量进行数值计算. 图 5 为不同泵浦功率下输出特性参量随腔长的变化曲线. 如图 5(a), 对于一定的泵浦功率存在一个最佳光纤长度, 泵浦功率较高时, 光纤长度大于 7 m 后输出功率达到饱和, 15 m 后明显减小, 故认为最佳光纤长度约在 7~15 m 之间; 如图 5(b)和(c), 阈值泵浦功率和斜率效率不随泵浦功率的变化而变化; 随着光纤长度的增加, 阈值泵浦功率逐渐提高, 斜率效率趋近于一个常量.

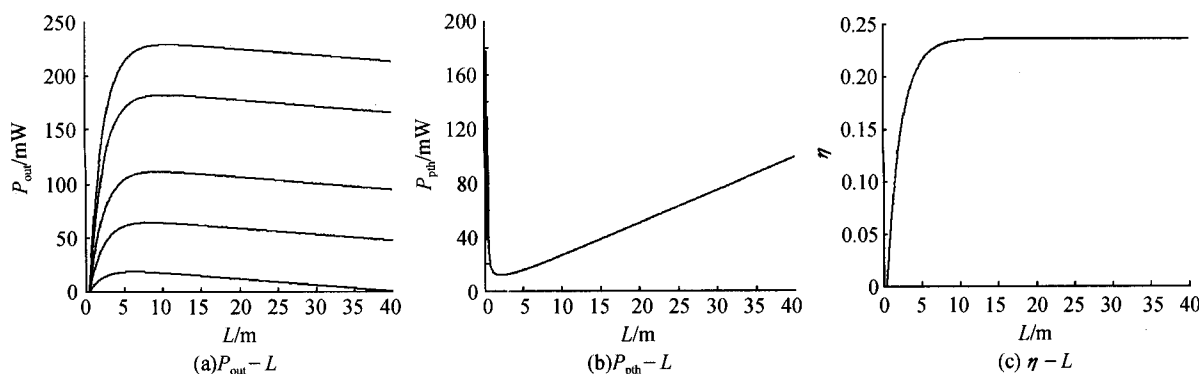


图 5 输出特性与腔长之间的关系
 Fig. 5 Output characteristics versus cavity length

图 6 给出不同泵浦功率和不同 R_1 时, 输出特性与输出腔镜反射率 R_2 的关系曲线, 当泵浦功率较大时, 输出功率和斜率效率随 R_2 的增加单调下降; 当泵浦功率较小时, 输出功率随 R_2 的变化不明显. 由此可见光纤光栅作为输出镜应该具有较低的反射

率. 但另一方面, 随着 R_2 的减小, 腔内振荡光反馈减弱, 阈值泵浦功率提高, 因此在线形腔光纤激光器设计时, 需要全面考虑, 对 R_2 进行优化.

图 7 表示不同泵浦功率和不同 R_2 时, 输出特性与 R_1 的关系. 输出功率随 R_1 增大而增大, 且 R_2

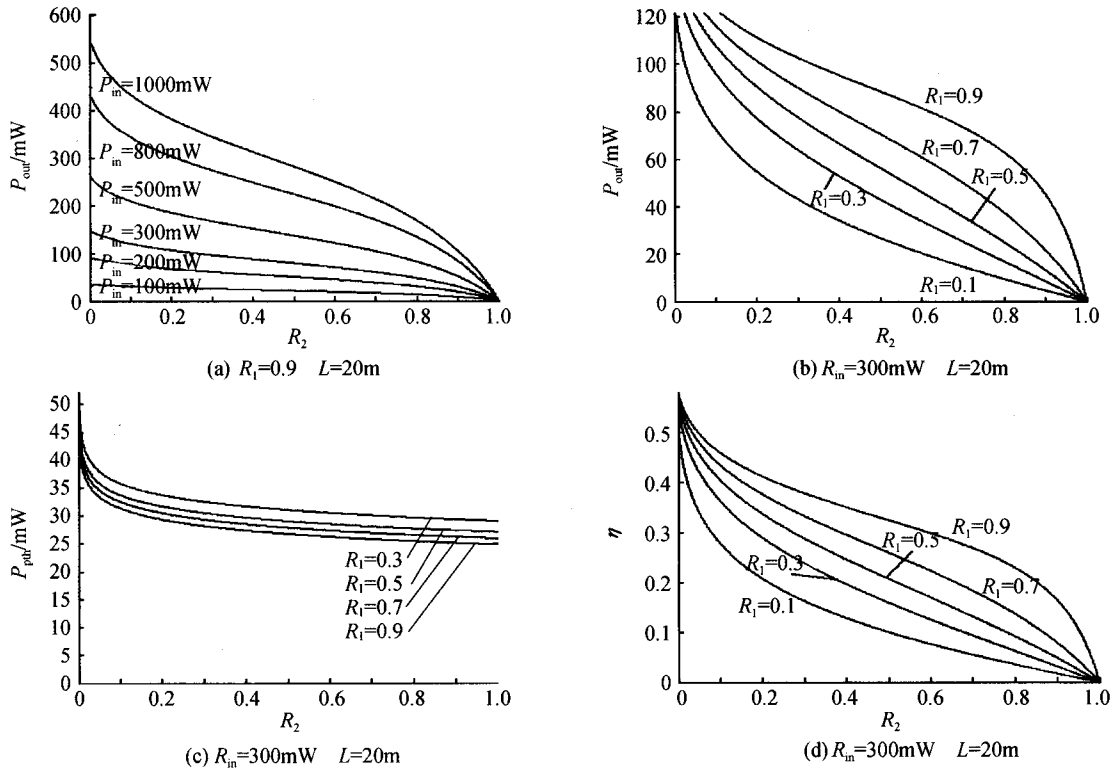


图 6 不同 R_1 时输出特性与输出反射镜 R_2 的关系
Fig. 6 Output characteristics versus R_2 in different R_1

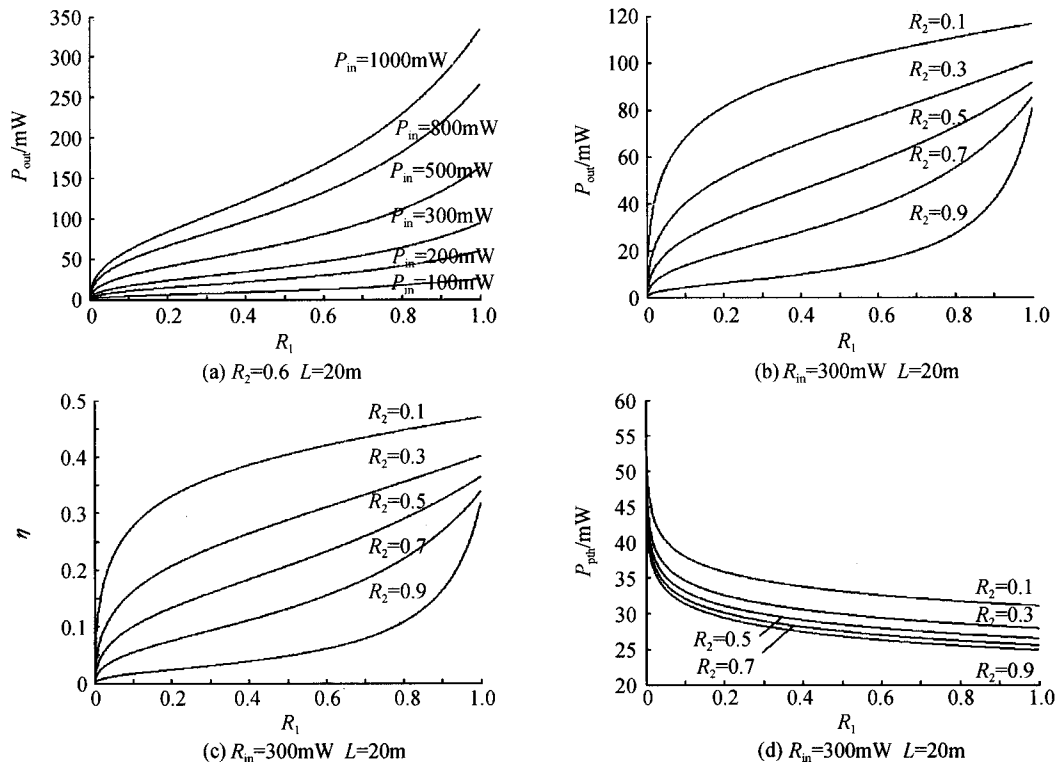


图 7 不同 R_2 下输出特性与入射镜反射率 R_1 的关系
Fig. 7 Output characteristics versus R_1 in different R_2

越小输出功率越大, 阈值越低. 当泵浦功率较大时, 输出功率随反射率 R_1 的增加而单调增加, 当泵浦功率减小时, 输出功率随 R_1 的变化不明显. 可见, 光纤环形镜作为全反端镜时, 对激光信号应该具有很高的反射率.

图8为利用本模型对基于光纤环形镜和光纤光栅作为腔镜的线形腔掺 Er^{3+} 激光器输出特性进行数值计算所得数据, 与实验测量结果符合很好, 如图8(b). 当输入电流为 600 mA, 输入功率对应 345 mW 时, 对应不同的输出端反射率(4%、60%、80%), 最大输出功率分别为 65.16 mW、18.6 mW 和 8.28 mW, 斜率效率分别为 18.9%、5.4% 和 2.8%. 其中理论模型数值计算的结果比实验结果稍微偏大, 这主要是由于实验过程中附加损耗引起的.

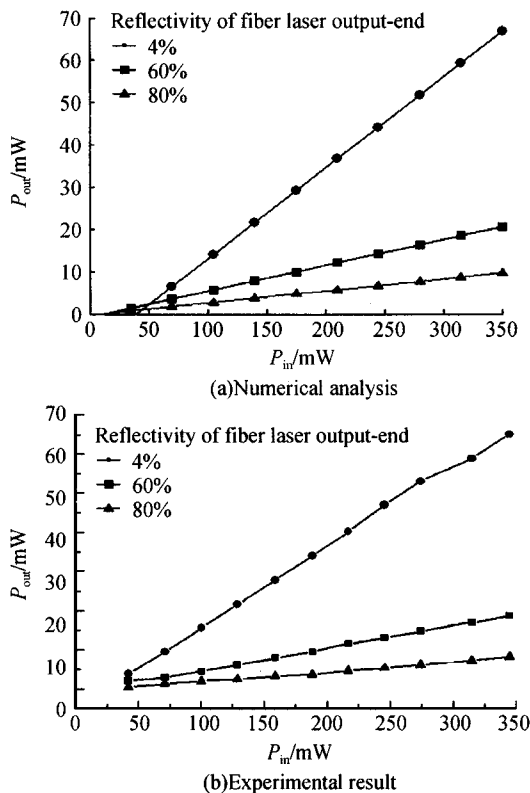


图8 掺 Er^{3+} 光纤激光器输出特性的数值模拟与实验测量
Fig.8 Numerical Analysis and experimental result of output characteristics of Er^{3+} doped fiber laser

5 结论

本文在分析光纤环形镜工作原理的基础上, 给

出了基于光纤环形镜的线形腔掺 Er^{3+} 光纤激光器相位和幅度的振荡条件. 通过求解速率方程, 理论分析了其输出特性, 获得了稳态条件下激光器输出功率、阈值泵浦功率和斜率效率的解析表达式. 推导出激光器工作所需掺 Er^{3+} 光纤最短长度, 以及在给定泵浦光功率时, 在特定输出波长上获得最大输出功率所需最佳掺 Er^{3+} 光纤长度的表达式. 并通过实验进行了验证, 为基于光纤环形镜和光纤光栅的线形腔掺 Er^{3+} 光纤激光器优化设计提供了理论参考.

参考文献

- Armitage J R, Wyatt R, Ainslie B J, *et al.* Highly efficient 980 nm operation of an Yb^{3+} doped silica fiber laser. *Electron Lett*, 1989, **25**(5): 298~299
- Yu A, Siddiqui A S. Optical modulators using fiber optic Sagnac interferometers. *IEEE Proc Optoelectron*, 1994, **141**(1): 1~7
- 聂秋华. 光纤激光器和放大器技术. 北京: 电子工业出版社, 1997
Nie Q H. Fiber Laser and Amplifier. Beijing: Publishing House of Electronics Industry. 1997
- 陈胜平, 吕可诚, 李乙钢, 等. 大功率高效率掺钕超荧光光纤光源及其应用. 光子学报, 2004, **33**(1): 17~20
Chen S P, Lü K C, Li Y G, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 17~20
- 蒙红云, 杨石泉, 赵春柳, 等. Sagnac型环形镜理论研究. 南开大学学报自然科学版, 2003, **36**(3): 1~84
Meng H Y, Yang S Q, Zhao C L, *et al.* *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2003, **36**(3): 1~84
- 黄志坚, 孙军强, 黄德修. 线形腔掺钕光纤激光器输出特性的理论研究. 光学学报, 1996, **16**(12): 1671~1675
Huang Z J, Sun J Q, Huang D X. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(12): 1671~1675
- 徐华斌, 陈林. 掺钕光纤激光器输出特性的研究. 光子学报, 2004, **33**(7): 777~781
Xu H B, Chen L. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 777~781
- 徐华斌, 陈林, 陈抱雪. 基于光纤环形镜的掺钕光纤激光器. 上海第二工业大学学报, 2001, (2): 1~6
Xu H B, Chen L, Chen B X. *Journal Shanghai Second Polytechnic University*, 2001, (2): 1~6

Theoretical Study and Numerical Analysis of Output Characteristics of Linear Cavity Er^{3+} doped Fiber Laser Based on Fiber Loop Mirror

Gao Xuesong, Gao Chunqing, Song Xueyong, Li Jiaze, Wei Guanghui

Dept. Optical-electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

Received date: 2005-08-06

Abstract Based on the analyzing the principle of fiber loop mirror, the resonant conditions of phase and intensity of Linear Cavity Er^{3+} doped Fiber Laser Based on Fiber Loop Mirror are obtained. The output characteristics of continuous Er^{3+} doped linear cavity fiber laser based on fiber loop mirror have been theoretically studied and numerically analyzed by solving rate equations, and analytical expressions on laser output power, threshold pump power and slope efficiency under stationary condition have been derived. The expression of minimum and optimum fiber length for designing a linear cavity Er^{3+} doped fiber laser has been given, which will be helpful to the optimization of designing a practical linear cavity Er^{3+} doped fiber laser of the same kind based on fiber loop mirror. 1550 nm maximums fiber laser output of slope efficiency 18.3% have been obtained in the experiment.

Keywords Physicelectronics; Fiber laser; Fiber loop mirror; Linear cavity; Er^{3+} doped fiber; Rate equation



Gao Xuesong was born in 1980. He received his B. S. degree from Optical Engineering Department of Beijing Institute of Technology in June of 2001. From September of 2001 he studies for his ph. D degree and his research interests include novel laser system (novel solid state laser, fiber laser and high power diode lasers, etc.), laser beam characterization, industrial and medical applications of laser.